

論文 フライアッシュを事前混合した砕砂を用いたコンクリートの基本特性および環境性能評価

福留 和人^{*1}・小門 勝彦^{*2}・守口 安保^{*2}・大前 延夫^{*3}

要旨: フライアッシュをコンクリートに混和する方法として細骨材に事前に混合する方法を提案した。フライアッシュを事前に混合した砂（以下、混合砂）をコンクリート製造プラントに供給すれば、フライアッシュ専用の貯蔵設備および計量設備が不要となる。室内試験により、混合砂を用いたコンクリートの基本特性の評価試験を実施し、問題のない性能を有していることを確認した。さらに、環境性能評価により、環境負荷低減が可能であることを確認した。

キーワード: フライアッシュ, 砕砂, 事前混合, 基本特性, 環境性能評価

1. はじめに

近年、良質な河川砂・山陸砂等の天然骨材の枯渇化、海砂の採取禁止の拡大などの影響から、砕砂の使用割合が増加しつつある¹⁾。一方、フライアッシュは、流動性の改善、耐久性の改善効果等を有し、コンクリートの性能改善の上で有効な混和材料である。しかしながら、フライアッシュのコンクリート用混和材としての利用は、セメント生産量の1%にも満たない規模であり、利用は進んでいない²⁾。フライアッシュをコンクリート用混和材として使用する場合、プラント設備にフライアッシュ専用の貯蔵設備および計量設備などの新たな設備投資が必要となるが、このことがフライアッシュのコンクリート用混和材としての利用が進まないことの大きな理由になっているものと考えられる。

以上のような背景から、著者らは事前にフライアッシュを細骨材に混合し、細骨材としてプラントに供給してコンクリートを製造することを検討した³⁾。この方法によれば、フライアッシュ専用の設備を設ける必要がなく、通常のコンクリートとほぼ同様の要領でフライアッシュを混和材として使用したコンクリートを製造することが可能となる。

本報告では、混合砂を用いたコンクリートの基本特性の評価試験および環境性能評価結果について述べる。

2. 基本特性評価

2.1 実験概要

(1) 使用材料

使用材料の一覧を表-1に、フライアッシュの品質を表-2に示す。フライアッシュは、JIS A 6201のII種の一般的な品質のものである。写真-1にフライアッシュの電子顕微鏡写真を示す。骨材は、産地の異なる3種類の

組合せ（骨材①（細骨材①と粗骨材①）、骨材②（細骨材②と粗骨材②）、骨材③（細骨材③と粗骨材③））とした。なお、細骨材③は、砕砂と高炉スラグ細骨材との混合使用とし、混合比は質量で50:50とした。

(2) フライアッシュと砕砂の混合方法

フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートに関する既往の研究⁴⁾から、フライアッシュの砕砂への混合割合は、質量で10%（内割）とした。フライアッシュと砕砂は、コンクリートミキサ（容量50lのパン型強制練り）で混合し、混合時間は3分とした。混合時の細骨材の表面水率は、1~2%程度、混合後の保管期間は、1~3日とした。混合砂は、無混合の細骨材と同様、密封できる容器で保管し、取扱いも同様とした。

表-1 使用材料

材料	種類	仕様
セメント C	普通ポルトランドセメント	3社混合,密度 3.16g/cm ³
混和材	フライアッシュ F	JIS A 6201 II種 密度 2.30g/cm ³
細骨材 S	① 砕砂 滋賀県伊吹産	密度 2.65g/cm ³ 吸水率:0.88%, F.M.2.53
	② 砕砂 兵庫県家島産	密度 2.58g/cm ³ , 吸水率:1.86%, F.M.2.75
	③ 混合 砕砂 (50%) 兵庫県家島産 高炉スラグ (50%) JFE ミネラル製	密度 2.57g/cm ³ , 吸水率 2.02%, F.M.2.67 密度 2.74g/cm ³ , 吸水率:0.79%, F.M.2.55
粗骨材 G	① 砕石 滋賀県伊吹産	最大寸法 20mm 密度 2.70g/cm ³
	② 砕石	最大寸法 20mm
	③ 兵庫県家島産	密度 2.63g/cm ³
混和剤 SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
	AE減水剤	ポリカルボン酸系
	AE剤	特殊界面活性剤

*1 (株)間組 技術研究所 コンクリートグループリーダー 博士(工学) (正会員)

*2 (株)関電パワーテック マネージャー

*3 (株)間組 大阪支店 部長 博士(工学)

表-2 フライアッシュの品質

項目		試験値
物理特性	密度(g/cm ³)	2.30
	比表面積(cm ² /g)	3,800
	45μmふるい残分(%)	12.0
	フロー値比(%)	112
	活性度指数	28日: 86 91日: 103
化学成分(%)	強熱減量	1.6
	湿分	0.07
	SiO ₂	60.07
	Al ₂ O ₃	24.06
	Fe ₂ O ₃	5.36
	CaO	2.21
	MgO	1.07

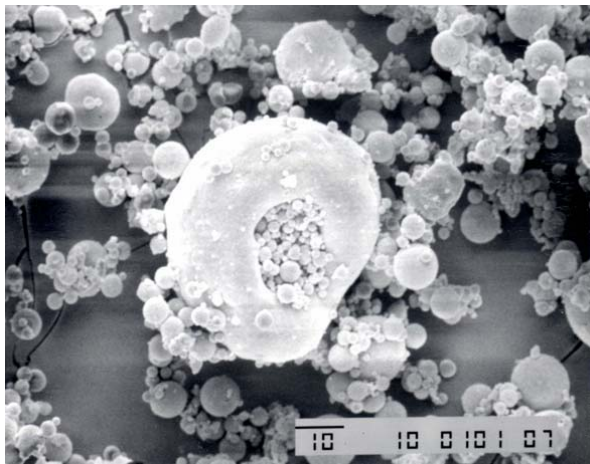


写真-1 フライアッシュの電子顕微鏡写真

(3) コンクリートの配合および練り混ぜ方法

コンクリートの配合は、2次製品およびレディーミクストコンクリートへの適用を考慮した配合（以下、2次製品配合および生コン配合と呼ぶ）の2種類とし、それぞれ、①フライアッシュ無混和、②フライアッシュ同時混和、③混合砂の3つのケースで比較した。単位水量、細骨材率および混和剤添加率は、①フライアッシュ無混和の条件でスランプ10~12cmとなるように選定し、フライアッシュを混和した配合では、粉体量が増加することを考慮し、細骨材率のみ2%低減した。空気量は、2次製品配合では2±1.0%、生コン配合では、4.5±1.0%とした。表-3にコンクリートの配合を示す。ここで、混和剤は、2次製品配合では高性能AE減水剤を、生コン配合ではAE減水剤を使用した。コンクリートの練混ぜには、容量50lのパン型強制練りを使用し、練混ぜ時間は、材料一括投入後3分間とした。

(4) 試験項目および試験方法

表-4に試験項目および試験方法を示す。ブリーディング、凝結硬化特性および長さ変化特性試験は、骨材③を使用した配合で実施した。コンクリートの養生は、20℃水中養生とし、試験時の温度は、20℃とした。

2.3 試験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの品質

表-5にフレッシュコンクリートの試験結果を、図-1にブリーディング試験結果を、図-2, 3に凝結硬化特性試験結果を示す。いずれの配合でも、フライアッシュの混和方法（同時混和と事前混合）がスランプに及ぼす影響はほとんど見られない。フライアッシュ混和（無混和と混和）による影響は、配合の種類により差が見られ、2次製品配合では、フライアッシュ混和によるスランプ

表-3 コンクリートの配合

配合	骨材	フライアッシュ混和方法	空気量の範囲(%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 SP (×C%)
						水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	
2次製品	①	無混和	2.0±1.0	40	38	155	388	—	707	1176	1.0
		同時混和			66			590	1213		
		事前混合			656 (混合砂)						
	②	無混和			40	170	425	—	697	1066	1.5
		同時混和			38			65	586	1101	
		事前混合			651 (混合砂)						
	③	無混和			40	170	425	—	717	1066	1.8
		同時混和			38			67	600	1101	
		事前混合			667 (混合砂)			340	730 (混合砂)		
50			283	786 (混合砂)					1099		
生コン	③	無混和	4.5±1.0	55	43	175	318	—	775	1019	0.85
		同時混和			41			72	724	1054	
		事前混合			796 (混合砂)						

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	
スランプ	JIS A 1101	
空気量	JIS A 1128	
ブリーディング	JIS A 1123	
凝結硬化特性	JIS A 6204	
物理特性	圧縮強度	JIS A 1108, 材齢1, 7, 28, 91日
	静弾性係数	JIS A 1149, 材齢1, 7, 28, 91日
	引張強度	JIS A 1113, 材齢28, 91日
	曲げ強度	JIS A 1106, 材齢28, 91日
	長さ変化	JIS A 1129, 材齢7日開始

の増加は見られないが、生コン配合では、フライアッシュ混和によるスランプの増加が見られる。フライアッシュ混和によるスランプへの影響は、粉体量の増加に伴う粘性増加作用とフライアッシュのボールベアリング作用が考えられるが、低水セメント比では、前者の影響が大きく、高水セメント比では、後者の影響が大きいものと推察される。

凝結硬化時間は、フライアッシュによる遅延作用のため、フライアッシュ混和により若干遅延する傾向は見られるが、遅延は、1時間程度であり、実用上は全く問題ないと考えられる。ブリーディングの収束までの時間は、フライアッシュ混和による凝結時間の遅延作用のため、若干長くなるが、最終ブリーディング率は、フライアッシュ混和により低下されている。これは、フライアッシュ混和による粉体量の増加により保水性が高まることによるものである。

表-5 試験結果 (フレッシュコンクリート)

配合	骨材	フライアッシュ 混和 方法	水セメント比 W/C (%)	試験結果			
				スランプ (cm)	空気量 (%)		
2 次 製 品	①	無混和	40	11.0	2.0		
		同時混和		9.5	2.0		
		事前混合		10.0	1.6		
	②	無混和		10.5	1.8		
		同時混和		12.0	1.7		
		事前混合		11.5	1.5		
	③	無混和		50	12.0	1.8	
					同時混和	13.0	1.8
		事前混合			12.0	1.8	
8.0			1.7				
生 コ ン		③	無混和		55	9.0	4.5
			同時混和			15.5	5.0
	事前混合		15.5	4.9			

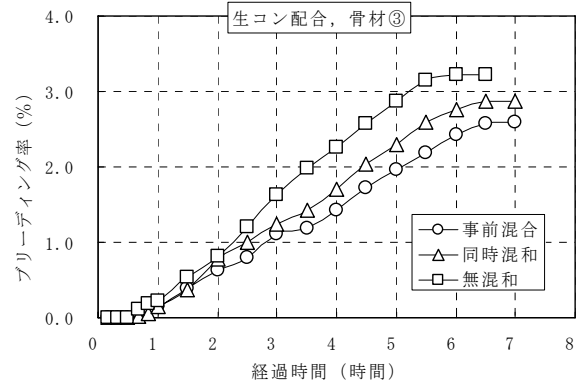


図-1 ブリーディング特性

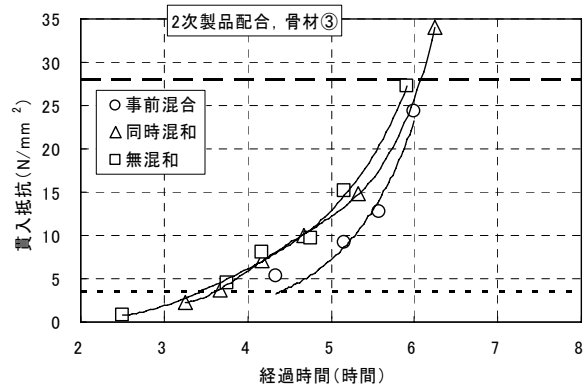


図-2 凝結硬化特性 (2次製品配合)

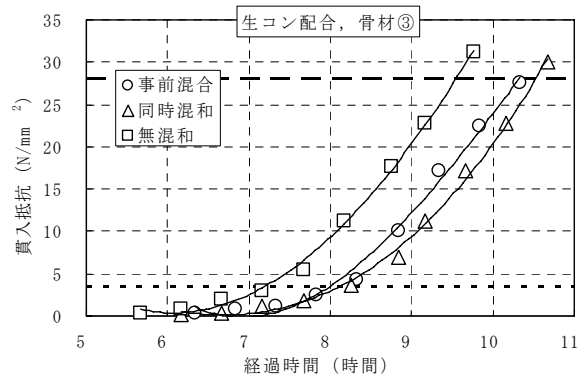


図-3 凝結硬化特性 (生コン配合)

(2) 硬化コンクリートの品質

図-4 にフライアッシュの混和が圧縮強度に及ぼす影響を示す。材齢1および7日の若材齢では、フライアッシュ混和による圧縮強度の改善効果はほとんど見られないが、材齢28日以降では、圧縮強度の改善が見られている。フライアッシュの混和方法による差も若干見られ、事前混合の方が、全体的に圧縮強度が高くなる傾向が見られる。写真-2 に混合砂の砂粒子の表面の電子顕微鏡写真を示す。この写真に特徴的な点は、フライアッシュ粒子が砂粒子の表面に多く付着していること、および、破壊された中空の粒子が観察されることである。事

前混合による圧縮強度改善効果の根拠を特定することは困難ではあるが、事前混合による細骨材とフライアッシュの付着により細骨材の界面が改善されること、中空灰の破壊によりフライアッシュが微粉化されることが、その一因である可能性も考えられる。

図-5~図-7にそれぞれ、圧縮強度と静弾性係数、引張強度および曲げ強度の関係を示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、骨材種類による影響が見られるが、フライアッシュの混和の有無、フライアッシュの混和方法の影響はほとんど見られない。引張強度は、若干ばらつきは見られるが、フライアッシュの混和の有無、フライアッシュの混和方法による差は、ほとんど見られない。曲げ強度は、ばらつきはやや大きくなっているが、フライアッシュを混和した方がやや高くなっている。

図-8に長さ変化試験結果を示す。フライアッシュの混和によって、長さ変化が若干大きくなる傾向は見られるが、その差は小さく、実用上は問題ないものと推察される。

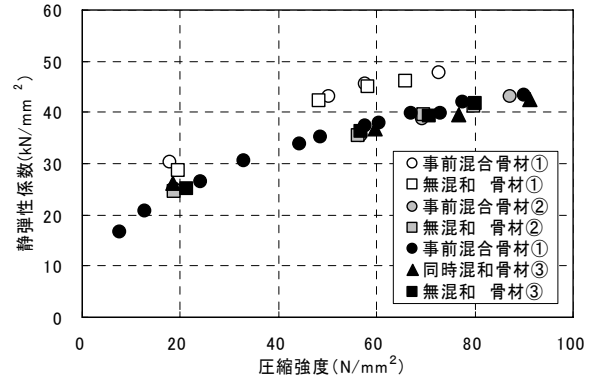


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

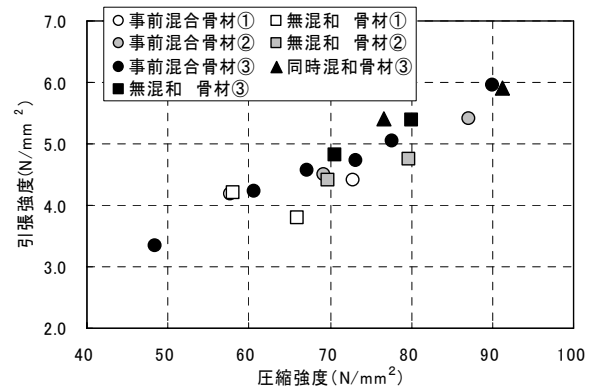


図-6 圧縮強度と引張強度の関係

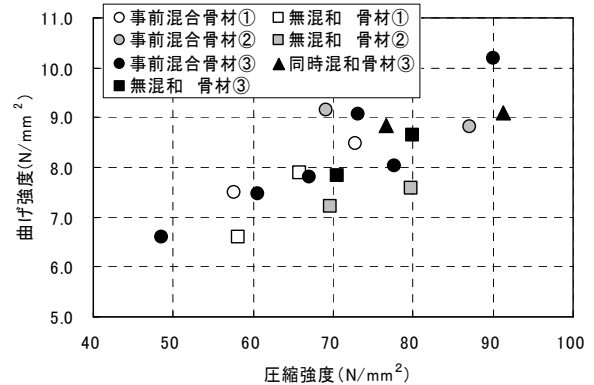


図-7 圧縮強度と曲げ強度の関係

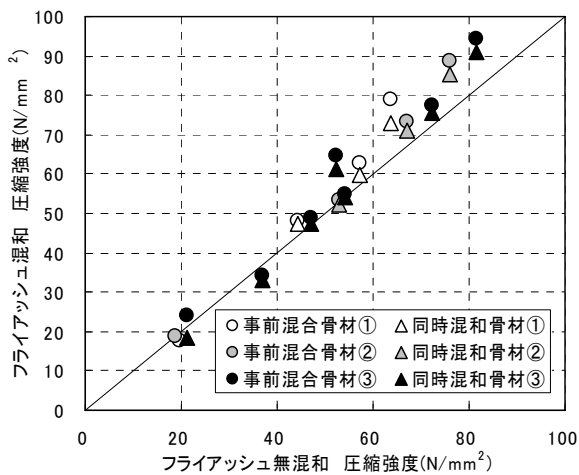


図-4 フライアッシュの混和が圧縮強度に及ぼす影響

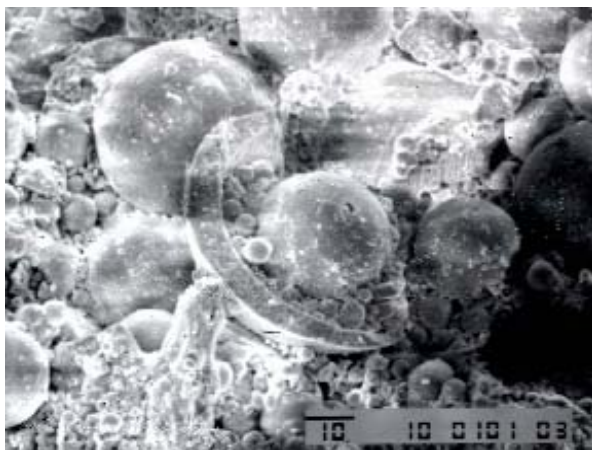


写真-2 混合砂の電子顕微鏡写真

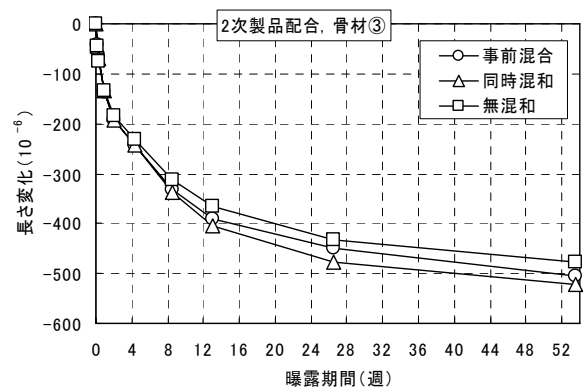


図-8 長さ変化試験結果

3. 環境性能評価

3.1 概要

フライアッシュをセメントの一部に置換する従来の方法によれば、セメント量が低減されるため、CO₂排出量の低減効果が期待できる⁵⁾。しかしながら、今回提案する混和方法では、フライアッシュと細骨材を混合して混合砂を製造する工程およびそれに伴うフライアッシュおよび細骨材を運搬する工程が従来に比べて追加され、環境負荷が増加することが懸念される。そこで、混合砂を用いてコンクリートを製造する時の環境負荷量の評価を行った。

表-6 算定条件

要因		算定条件
使用材料		各材料製造原単位
混合砂製造	製造場所	採石場にてフライアッシュ混合
	フライアッシュ運搬距離	①50km, ②100km, ③200km (発電所までの距離)
	混合方法	生コンプラントと同様設備
材料運搬	各材料	10tディーゼルトラック, 距離 20km
	フライアッシュ	10tジェットトラック
コンクリート製造		生コンプラント練り混ぜ

3.2 算定条件

表-6 に環境負荷量の算定条件を示す。材料の運搬を極力少なくするために、採石場にてフライアッシュと砕砂の混合を行う条件とし、発電所からの距離を変化させてその影響を調べた。配合は、2次製品配合および生コン配合の2種類とし、それぞれフライアッシュ無混和、同時混和、事前混合（混合砂）の3ケースで比較した。使用材料は、骨材③を使用した条件とした。同一性能の条件で評価するために、同一スランプ（12cm）および圧縮強度（材齢 28 日）となるように、単位水量および水セメント比を補正した。ここで、細骨材補充混和材という観点から、水セメント比を調整しない配合でも比較を行った。単位水量の補正は、コンクリート標準示方書の補正の目安に準じ、スランプ 1cm 当たり単位水量を 1.2% だけ増減した。水セメント比は、室内試験で得られた強度式（骨材③、2次製品配合 $F28=29.1 \cdot C/W+0.8$ ）により補正した。表-7 にコンクリートの配合を示す。インベントリデータは、コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）⁶⁾より引用した（表-8 参照）。

表-7 コンクリートの配合

配合	フライアッシュ混和方法	水セメント比の調整	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 SP (kg/m ³)
					水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	
2次製品	無混和	—	40	40	170	425	—	717	1066	7.65
	同時混和 事前混合	未調整					67	600	1101	
			667 (混合砂)							
	同時混和 事前混合	調整	42.5	38		400	67	608	1114	7.20
		675 (混合砂)								
生コン	無混和	—	55	43	169	181	330	—	1003	2.81
	同時混和 事前混合	未調整					73	661	1069	
			734 (混合砂)							
	同時混和 事前混合	調整	55.9	41		302	74	662	1072	2.57
		736 (混合砂)								

表-8 インベントリデータ

算定項目		単位	原単位			
			CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /*)	SO _x 排出量 (kg-SO _x /*)	NO _x 排出量 (kg-NO _x /*)	ばいじん (kg/*)
材料製造	セメント	t	765.5	1.55	1.55	0.001099
	砕砂	t	3.4	0.005860	0.00586	0.000132
	粗骨材	t	2.8	0.004150	0.00415	0.000153
	フライアッシュ	t	17.9	0.007540	0.00754	0.000009
	減水剤	t	121	—	—	0.001099
混合砂製造	砕砂運搬	km・t	0.117	0.000875	0.000875	0.000097
	フライアッシュ運搬	km・t	0.122	0.000914	0.000914	0.000056
	混合	t	7.7	0.065100	0.065100	0.000124
材料運搬	セメント	km・t	0.122	0.000914	0.000914	0.000047
	砕砂	km・t	0.117	0.000875	0.000875	0
	粗骨材	km・t	0.117	0.000875	0.000875	0.000157
	混合砂	km・t	0.117	0.000875	0.000875	0.000437
	フライアッシュ	km・t	0.122	0.000914	0.000914	0
	減水剤	km・t	0.122	0.000914	0.000914	0.000401
コンクリート製造		t	7.7	0.003420	0.065100	0.000761

表-9 環境負荷量算定結果（コンクリート100m³当たり）

配合	フライアッシュ 混和 方法	水セメント比 の補正	発電所か らの距離 (km)	環境負荷量			
				CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /*)	SO _x 排出量 (kg-SO _x /*)	NO _x 排出量 (kg-NO _x /*)	ばいじん (kg/*)
2 次 製 品	無混和	—	—	35372	0.00764	0.08562	0.00291
	同時混和	未調整	100	35524	0.00765	0.08609	0.00294
	事前混合		50	36013	0.00847	0.09324	0.00333
			100	36053	0.00850	0.09355	0.00336
			200	36135	0.00856	0.09415	0.00341
	同時混和	調整	100	33616	0.00736	0.08221	0.00285
	事前混合		50	34110	0.00467	0.04064	0.00293
			100	34152	0.00822	0.08977	0.00328
200			34234	0.00828	0.09038	0.00333	
生 コ ン	無混和	—	—	28068	0.00646	0.07069	0.00255
	同時混和	未調整	100	26497	0.00623	0.06770	0.00251
	事前混合		50	27035	0.00714	0.07558	0.00295
			100	27079	0.00717	0.07592	0.00298
			200	27169	0.00724	0.07659	0.00303
	同時混和	調整	100	26118	0.00618	0.06694	0.00250
	事前混合		50	26657	0.00708	0.07483	0.00293
			100	26701	0.00712	0.07517	0.00296
200			26791	0.00719	0.07584	0.00302	

3.3 算定結果

表-9 に環境負荷量算定結果を示す。2 次製品配合の場合、混合砂使用によるスランプの増加が見られないことから、フライアッシュの運搬および混合工程が追加されるため、CO₂排出量は増加する。フライアッシュ混和による圧縮強度の増加を考慮して水セメント比を調整すれば単位セメント量が低減されるため、事前混合で発電所からの距離が 200km と大きい場合でも CO₂ 排出量は低減される。生コン配合の場合、フライアッシュ混和に伴ってスランプが増加することから、単位水量およびセメント量が低減されるため、CO₂ の排出量は低減される。水セメント比を調整した場合には、さらに低減される。SO_x、NO_x、ばいじん排出量は、事前混合の場合には、混合工程が追加されるため、若干増加する傾向がある。

4. まとめ

本研究では、フライアッシュを事前混合した混合砂を用いたコンクリートの基本特性の評価試験および環境性能評価を行った。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 混合砂を用いたコンクリートのフレッシュコンクリートの性状および凝結硬化特性は、同時混和のコンクリートと同等である。
- (2) 混合砂を用いたコンクリートの圧縮強度は、同時混和のコンクリートより若干高くなる。
- (3) 混合砂を用いたコンクリートの静弾性係数、引張強度、曲げ強度と圧縮強度の関係は、無混和、同時混和のコンクリートと同様である。

- (4) 混合砂使用よりスランプが増加する生コン配合では、セメント量減により環境負荷は低減される。
- (5) 低水セメント比の 2 次製品配合では、混合砂使用によるスランプの増加が見られないため、フライアッシュ運搬・混合工程のため環境負荷は、増加するが、圧縮強度の増加を考慮して、水セメント比を調整すれば、セメント量減により環境負荷は低減される。

謝辞：本研究の実施に当たり京都大学河野広隆教授にご指導を頂いた。また、FS プロジェクトメンバーには、多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 経済産業省・経済産業局：平成 19 年生コンクリート統計年報、都道府県別原材料等消費内訳、2008.3
- 2) (財) 石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書（平成 18 年度実績）、2006
- 3) 福留，小門，守口，大前：フライアッシュを事前混合した砕砂の実用化に関する研究，コンクリート工学，Vol.46，No.10，pp.19～26，2008.10
- 4) 土木学会：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案），2003.3
- 5) 増田，堺，高野，石井：環境負荷低減を目指したフライアッシュ利用コンクリートの開発に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.159～164，2008.7
- 6) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005.11